



# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

## EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM SECADOR DE TORAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Danilo Barros Donato<sup>1</sup>  
Fabiana Paiva de Freitas<sup>1</sup>  
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro<sup>2</sup>  
Marco Tulio Cardoso<sup>1</sup>  
Mateus Alves de Magalhães<sup>1</sup>  
Humberto Fauller de Siqueira<sup>1</sup>  
Matheus Fernandes de Carvalho Reis<sup>1</sup>  
Reginaldo de Padua Barbosa Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa

<sup>2</sup> UFV -DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL / Universidade Federal de Viçosa



## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

### EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM SECADOR DE TORAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Danilo Barros **DONATO**<sup>1</sup>; Fabiana Paiva De **FREITAS**<sup>1</sup>; Angélica De Cassia Oliveira **CARNEIRO**<sup>1</sup>; Marco Tulio **CARDOSO**<sup>1</sup>; Mateus Alves **MAGALHÃES**<sup>1</sup>; Humberto Fauller De **SIQUEIRA**<sup>1</sup>; Matheus Fernandes de Carvalho **REIS**<sup>1</sup>; Reginaldo De Padua Barbosa **SOUZA**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

**Resumo:** O Objetivo deste estudo foi avaliar as perdas térmicas e eficiência térmica de um secador metálico para secagem de toras para produção de carvão vegetal. O secador foi construído com chapa galvanizada, paredes de 40 mm de espessura com isolamento térmico e um volume total de 35 m<sup>3</sup>. A secagem da madeira foi realizada durante aproximadamente 68 horas. A temperatura média de admissão dos gases para dentro do secador foi de 150 °C. Avaliou-se as características térmicas do sistema de secagem das toras, coletando-se a temperatura dos gases da carbonização, da câmara de combustão da fornalha, dos gases combustos, em pontos determinados ao longo da tubulação de transporte e do gás úmido de saída do secador. As perdas térmicas ocorridas na tubulação de transporte dos gases foram calculadas considerando o sistema em regime estacionário, propriedades constantes, gás ideal, dissipação viscosa e variações de pressão estática desprezíveis e resistência térmica da tubulação desprezível. Determinou-se a energia térmica intensiva (J/s por tonelada de madeira seca) e a eficiência térmica. Houve uma redução média de apenas 70 °C na temperatura do gás transportado desde a saída do misturador de ar até a abertura de controle de temperatura na entrada no secador, sendo a perda térmica calculada de 1461 W. A temperatura média de saída dos gases úmidos do secador foi de 56 °C, indicando uma redução de aproximadamente 100 °C. Conclui-se que as perdas térmicas ocorridas nas tubulações do transporte de gases não afetaram a temperatura de entrada dos gases no secador.

**Palavras-chave:** Carbonização, eucalipto, fornalha, secagem da madeira.

### THERMAL EFFICIENCY OF A TORQUE DRYER FOR VEGETABLE COAL PRODUCTION

**Abstract:** The objective of this study was to evaluate the thermal losses and thermal efficiency of a metallic dryer for drying logs for the production of charcoal. The dryer was built with galvanized sheet, 40 mm thick walls with thermal insulation and a total volume of 35 m<sup>3</sup>. The drying of the wood was carried out for approximately 68 hours. The average inlet temperature of the gases into the dryer was 150 °C. The thermal characteristics of the log drying system were evaluated by collecting the temperature of the carbonization gases, the combustion chamber of the furnace, the combustion gases at determined points along the transport pipe and the exit gas dryer. The thermal losses occurred in the gas transport piping were calculated considering the steady state system, constant properties, ideal gas, viscous dissipation and negligible static pressure variations and negligible tubing thermal resistance. The thermal energy (J / s per ton of dry wood) and thermal efficiency were determined. There was an average reduction of

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

only 70 ° C in the temperature of the gas transported from the outlet of the air mixer to the temperature control opening at the inlet in the dryer, the calculated thermal loss being 1461 W. The average outlet temperature of the humid gases of the dryer was 56°C, indicating a reduction of approximately 100°C. It is concluded that the thermal losses occurred in the gas transport pipes did not affect the temperature of the gases in the dryer.

**Key words:** Carbonization, eucalyptus, furnace, Wood drying.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de produção de carvão vegetal envolve inúmeras etapas, ocorrendo muitas perdas até que se tenha o produto final. A água na madeira é um dos principais problemas, indubitavelmente, desde o transporte das toras até a unidade de produção de carvão vegetal, até no processo de carbonização, tendo influência inclusive na qualidade do carvão. As unidades de produção de carvão vegetal utilizam madeira com as mais variadas umidades. Em função da grande demanda, não é possível, muitas vezes, aguardar o tempo necessário para secagem natural, realizando a carbonização de madeiras com altas umidades iniciais.

Além do alto teor de umidade inicial, outro problema é a sua grande variação entre as toras e ao longo do comprimento de uma tora. Logo, para carbonização, a carga de madeira deve ter um teor de umidade médio de 30 %, base seca, porém, a variação da umidade entre as toras deve ser a menor possível, afim de que se produza carvão em quantidade e qualidade altas.

O desenvolvimento de secadores de toras, visando a produção de carvão vegetal, ainda é incipiente, contudo, essa é uma alternativa de grande importância na cadeia produtiva do carvão vegetal, promovendo diversos ganhos, sendo menor tempo de secagem, menor necessidade de estocagem de madeira, redução da poluição, redução do ciclo de carbonização com aumento da produtividade, elevação do rendimento gravimétrico e melhoria da qualidade do carvão vegetal.

Atualmente a queima dos gases da carbonização é uma tecnologia muito difundida entre as grandes empresas, por meio da qual obtém-se grande quantidade de energia térmica, logo, o aproveitamento dessa energia para a secagem das toras em secadores torna-se uma alternativa atraente.

A eficiência térmica, mesmo sendo utilizada energia aproveitada da combustão dos gases, deve ser levada em consideração, para que sejam desenvolvidos secadores otimizados, os quais tenham capacidade de remover a maior quantidade de água possível das toras.

Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de secadores para toras, capazes de, aproveitar a energia térmica resultante da queima dos gases da carbonização, reduzir o teor de umidade e gerar carga de madeira com baixa variação entre toras e ao longo do comprimento das toras.

O Objetivo deste estudo foi avaliar as perdas térmicas e eficiência térmica de um secador metálico para secagem de toras para produção de carvão vegetal.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Descrição do Secador metálico e do Sistema de transporte dos gases

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

O secador foi construído com chapa galvanizada de 2,00 mm, estruturado em perfil quadrado, paredes de 40 mm de espessura com isolamento térmico feito com manta de fibra cerâmica aluminada, com densidade de 160 kg/m<sup>3</sup> e espessura de 38,10 mm. As dimensões internas do secador metálico foram de 2,50 m de altura; 0,70 m de flecha de copa; 4,20 m de comprimento; 3,10 m de largura; abertura de porta de 3,0 m.

O teto do secador foi feito no formato de uma seção cilíndrica, com objetivo de facilitar o fluxo dos gases combustos dentro do secador. O volume total do secador foi de 35 m<sup>3</sup> e o volume utilizado para a secagem da madeira foi de 16,8 m<sup>3</sup>.

As portas do secador foram feitas em forma de abas, também isoladas termicamente com a manta cerâmica. Na parede oposta à porta, na parte superior, foi instalado um distribuidor principal dos gases combustos, em uma altura de 2,00 m acima do piso, contendo 4 aberturas secundárias para melhor distribuição do fluxo de gás dentro do secador. A tubulação do distribuidor, bem como as aberturas secundárias, possuía diâmetro interno de 150 mm, posicionadas de modo a formar um ângulo de 90° com o piso do secador, sendo direcionadas para o teto.

Foram instalados, também, na parede oposta a porta, intercalados as 4 aberturas do distribuidor dos gases combustos, três ventiladores axiais, acionados individualmente por motores de 0,5 cv de potência, com 1800 rpm, cuja função foi promover uma melhor distribuição dos gases combustos dentro do secador. Nesta mesma parede, na parte inferior, foram feitas 4 aberturas, com diâmetro de 150 mm para exaustão dos gases úmidos de dentro do secador. As aberturas foram conectadas a um único ventilador centrífugo de 5 cv e 1725 rpm para proceder a exaustão. Todos os ventiladores utilizados no sistema foram conectados a um único painel elétrico com comando independente.

## 2.2 Descrição do sistema de Transporte dos gases

A temperatura dos gases na saída da chaminé é de aproximadamente 500 °C, superior a temperatura utilizada para secagem artificial da madeira, logo foi necessário a construção de um misturador de ar para reduzir sua temperatura, para que eles entrassem no secador com temperatura de aproximadamente 150 °C.

A tiragem dos gases combustos foi feita na chaminé, a 2,20 metros acima da base da fornalha, por meio de tubulação de aço inoxidável, de 2 mm de espessura, sendo esta conectada ao misturador, que foi construído com tijolos maciços, nas dimensões internas de 0,80 m de largura, 0,80 m de comprimento e 0,80 m de altura, posicionado ao lado da base da fornalha. Na parte superior do misturador, paralelo à tubulação de tiragem, instalou-se uma tubulação, fabricada com chapas galvanizadas, de 2 mm de espessura, com 150 mm de diâmetro interno, para efetuar o transporte dos gases até o secador. Esta tubulação foi conectada a um ventilador centrífugo (soprador) de 3 cv de potência e 1725 rpm, responsável por promover a sucção dos gases combustos do misturador para conduzi-los até o secador. Nessa mesma tubulação, posicionada a 1,5 m do piso, utilizou-se uma abertura, de 12 x 15 cm, com acionamento manual de fechamento, para controle da temperatura dos gases na entrada do secador. Na saída do soprador foi conectada uma tubulação, com as mesmas características já descritas, conectando-o ao secador em uma altura de 2,00 m do piso. Neste ponto conectou-se o distribuidor dos gases combustos.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

Na Figura 1 é apresentado um esquema do conjunto forno/fornalha, secador e tubulações de transporte de gases.

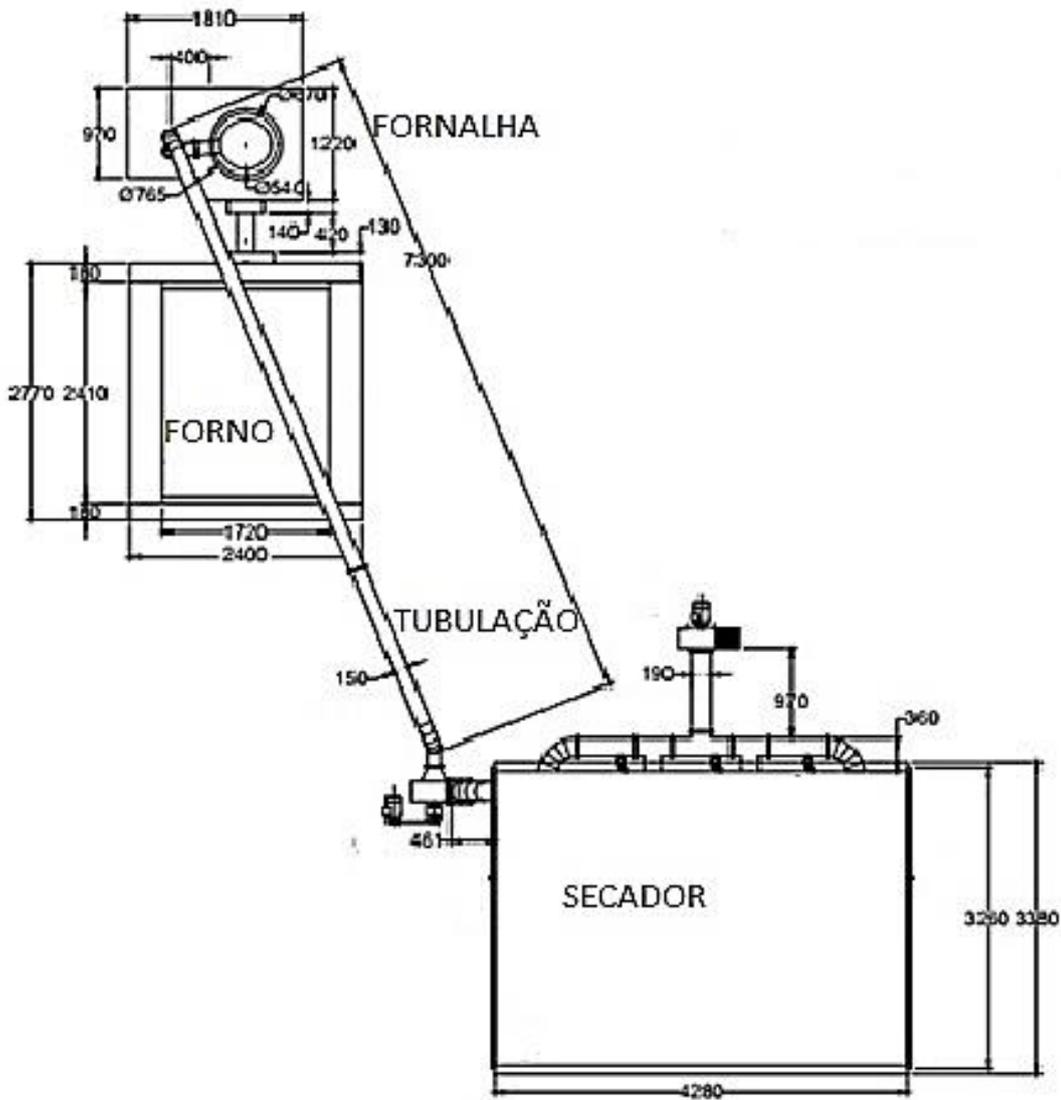


Figura 1. Esquema do conjunto forno/fornalha, tubulações e secador (dimensões em mm).

## 2.3 Secagem artificial da madeira

A secagem da madeira foi realizada durante aproximadamente 68 horas. Esse tempo foi estabelecido em função do tempo médio total de carbonização da madeira no forno MF/UFV. A temperatura média de admissão dos gases para dentro do secador foi de 150 °C. Foram realizadas duas secagens por classe de diâmetro, totalizando 6 unidades amostrais.

A pilha de madeira foi disposta horizontalmente dentro do secador, no sentido porta/fundo, tendo altura máxima de aproximadamente 2,0 m, largura de 2,0 m

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

(correspondente ao comprimento das toras) e comprimento de 4,20 metros, sendo mantida uma distância aproximada de 25 cm entre o final da pilha e o fundo do secador.

### 2.4 Perfil de temperatura dos gases combustos

Avaliou-se as características térmicas do sistema de secagem das toras, coletando-se a temperatura dos gases da carbonização, da câmara de combustão da fornalha, dos gases combustos, em pontos determinados ao longo da tubulação de transporte e do gás úmido de saída do secador.

A temperatura do sistema de transporte de gases foi monitorada a cada 2 horas, por meio de orifícios feitos na tubulação, que permitiram a introdução de termopar tipo K, que foi conectado em um datalogger ICEL, modelo TD - 880. Os pontos de monitoramento foram estabelecidos de modo que permitisse a avaliação das perdas térmicas e eficiência do sistema, e foram assim dispostos:

- a) Duto condutor dos gases da carbonização, localizado entre o forno e a base da fornalha;
- b) Câmara de combustão da fornalha, na altura de 1,5 m a partir do piso;
- c) Tubulação de aço inoxidável condutora dos gases combustos para o misturador, na altura de 1,8 m;
- d) Tubulação de saída dos gases combustos do misturador, na altura de 1,8 m a partir do piso;
- e) Tubulação de conexão entre o misturador e o ventilador centrífugo, 20 cm acima da abertura de controle manual;
- f) Tubulação conectada ao distribuidor dos gases combustos para dentro do secador, a 2,00 m de altura do piso;
- g) Tubulações de saída do ar úmido de dentro do secador;
- h) Tubulação de junção das 4 saídas de ar úmido;
- i) Duto de saída do ventilador centrífugo de tiragem.

As perdas térmicas ocorridas na tubulação de transporte dos gases foram calculadas considerando o sistema em regime estacionário, propriedades constantes, gás ideal, dissipação viscosa e variações de pressão estática desprezíveis e resistência térmica da tubulação desprezível. Além disso, os cálculos foram realizados considerando a tubulação como retilínea, sendo da saída do misturador até a abertura de admissão de ar atmosférico para controle da temperatura do gás de entrada do secador.

Considerou-se os parâmetros obtidos de temperatura média dos gases combustos na entrada da tubulação descrita, temperatura ambiente de 25 °C e temperatura de saída calculada.

Na Figura 2 é apresentado o esquema da tubulação de transporte de gases, com os parâmetros considerados no cálculo de perda térmica.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

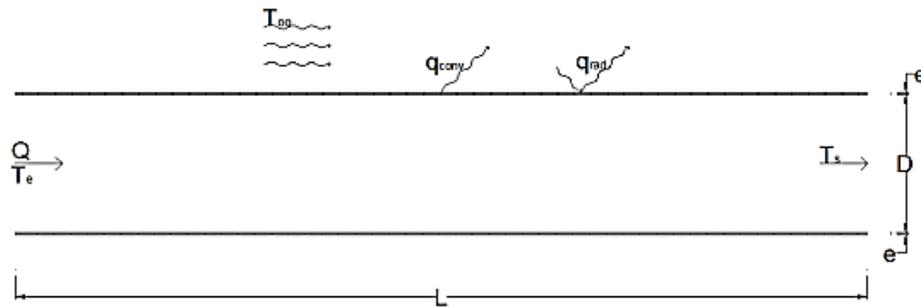


Figura 2. Esquema da tubulação com os parâmetros considerados no cálculo de perda térmica.

Para o cálculo a diferença de temperatura entre os gases combustos na entrada e saída da tubulação, considerou-se primeiro o calor sensível, devido à variação de temperatura:

$$q = \dot{m}c_p(T_s - T_e)$$

Colocando em função da vazão volumétrica, tem-se:

$$q = \rho Q c_p (T_s - T_e) \quad (1)$$

Em que:

$q$  = taxa de transferência de calor (W)

$\rho$  = massa específica do gás ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Q$  = vazão volumétrica ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$c_p$  = calor específico do gás ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )

$T_s$  = temperatura de saída dos gases combustos (K)

$T_e$  = temperatura de entrada dos gases combustos (K)

Assim, conhecendo a temperatura de saída, calculou-se a quantidade de energia transferida para a vizinhança pela equação 1.

## 2.4.1 Características térmicas do secador

Para obter o perfil de temperaturas do secador, estabeleceu-se 16 pontos de monitoramento distribuídos ao longo do secador, sendo dois pontos na copa, três pontos em cada parede lateral, dois pontos na porta e seis pontos na parte de trás do secador, oposta a porta.

As temperaturas foram obtidas usando termopares tipo K. Foram feitos orifícios de 11 mm de diâmetro nos pontos estabelecidos para o monitoramento de temperatura, no quais foram introduzidos tubos de alumínio, de diâmetro interno de 10 mm, com comprimento aproximado de 10 cm, de modo que não houvesse frestas que permitissem a comunicação com a parte interna das paredes revestidas com manta cerâmica, a fim de evitar perdas térmicas e interferências nas leituras da temperatura. A temperatura da copa foi obtida com termopares tipo K, conectados a um datalogger Gulterm 700.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

A distribuição das temperaturas do secador foi realizada por meio de imagens termográficas, utilizando uma câmera infravermelha (FLIR 40) fator de emissividade de 0,95. As imagens foram obtidas a 10 metros de distâncias do sistema.

### 2.4.2 Eficiência térmica do secador

Para determinação da eficiência térmica do secador, primeiramente calculou-se a quantidade de energia na forma de calor sensível fornecida para as secagens, por meio da seguinte equação:

$$Q = V \cdot \rho \cdot cp \cdot \Delta t$$

Em que:

Q = Calor sensível fornecido para secagem (J/s)

V = vazão dos gases na entrada do secador (0,2 m/s)

$\rho$  = densidade da mistura de gases (g/m<sup>3</sup>)

cp = calor específico do ar (kJ/(kg\*K))

$\Delta t$  = diferença de temperatura entre entrada/saída dos gases do secador (K)

A vazão dos gases, na entrada do secador, foi medida com tubo de Pitot.

O calor específico dos gases foi obtido por meio de consulta em literatura (INCROPERA, 2011), para cada faixa de temperatura utilizada.

Para estimar a quantidade de energia necessária para retirada de água da madeira para cada classe de diâmetro avaliada, utilizou-se o valor de massa de água eliminada nas secagens, separando a porcentagem de água livre e a porcentagem de água de adesão. Para este procedimento observou-se o valor de umidade final obtido após as secagens. Logo, quando a umidade final foi abaixo de 30 %, verificou-se a proporção de água de adesão, já quando a umidade final manteve-se acima de 30 %, considerou-se que toda água eliminada foi água livre.

Essa distinção foi necessária, pois para a retirada da massa de água livre gasta-se aproximadamente 569 kcal/kg e para remover a água de adesão 829 kcal/k, segundo Skaar (1972).

Determinou-se a energia térmica intensiva (J/s por toneladada de madeira seca) dividindo-se a energia fornecida para secagem, que corresponde ao calor sensível, pela massa seca de madeira.

### 2.5 Balanço de massa e energia

#### 2.5.1 Consumo de energia elétrica pelo secador

Para medir o consumo de energia elétrica do secador foi instalado no painel elétrico central um Medidor de Consumo trifásico, analógico, FAE MFT – 04G Classe 2, obtendo-se a energia gasta pelo sistema durante as 68 horas de funcionamento do secador. As medições foram realizadas em quatro secagens aleatórias, ou seja, quatro repetições. Foi determinado o consumo total e por meio de média aritmética definiu-se o consumo médio de cada secagem.

A energia elétrica intensiva foi obtida dividindo-se o consumo médio de energia elétrica do secador pela massa seca de madeira (0% de umidade), obtendo o valor em kW por tonelada de madeira.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

### 3. RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentadas as temperaturas médias dos gases.

Tabela 1. Temperaturas médias dos gases.

Pontos de monitoramento	Temperatura média °C		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Temperatura dos gases de saída do forno	80,1±50,2	73,8±40,2	104,2± 64,6
Temperatura da câmara de combustão da fornalha	756,3±171,5	783,5±157,2	654,1±120,4
Temperatura dos gases combustos na entrada do misturador de ar	433,9±105,6	471,8±126,6	450,1±105,6
Temperatura dos gases na saída do misturador de ar	323,1±72,4	344,2±58,1	298,3±63,9
Temperatura dos gases anterior à abertura de admissão de ar (controle)	261,9±49,7	258,1±34,0	231,3±32,5
Temperatura dos gases combustos na entrada do secador	159,9±14,8	155,8±7,5	153,4±7,3
Temperatura média do gás de saída do secador (gás úmido)	60,4±11,2	57,8±7,4	49,4±8,0
Temperatura dos gases anterior ao ventilador de tiragem	58,3±10,3	55,6±7,0	48,5±7,5
Temperatura dos gases posterior ao ventilador de tiragem	54,4±9,9	50,7±8,4	48,3±7,6

\*Os valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

A temperatura na câmara de combustão é um parâmetro importante a ser considerado e deve ser mantida acima de 650 °C para que ocorra a combustão completa de alcatrão, do licor pirolenhoso, dos fenóis e dos gases CO e CH<sub>4</sub>, transformando-os em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, além de reduzir o material particulado, conforme observado por Oliveira (2012). Observa-se que a temperatura média na câmara de combustão da fornalha, independente da classe de diâmetro da madeira, foi superior a 650 °C, mantendo assim a eficiência da combustão dos gases pelo sistema utilizado.

O misturador de ar tem a função de reduzir a temperatura dos gases combustos da fornalha até valores adequados para proceder a secagem. Observa-se que houve uma redução de cerca de 100 °C na temperatura do gás após a passagem pelo misturador, evidenciando a sua efetividade para controle da temperatura dos gases combustos.

Observa-se que houve uma redução média de apenas 70 °C na temperatura do gás transportado desde a saída do misturador de ar até a abertura de controle de temperatura na entrada no secador, sendo a perda térmica calculada de 1461 W.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

A temperatura média de saída dos gases úmidos do secador foi de 56 °C, indicando uma redução de temperatura de aproximadamente 100 °C. Vale salientar que todas as paredes do secador receberam isolamento térmico, logo espera-se que a maior parte da energia na forma de calor, tenha sido transferida para as toras, favorecendo a secagem.

Na Tabela 2 são apresentadas as temperaturas dos gases em função da posição no secador.

Tabela 2. Temperaturas médias do secador em função da posição do termopar.

Posição no secador	Temperatura média °C			Média
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
Copa	84,0±8,2	87,3±9,9	71,9±7,7	81,09 A
Lateral esquerda	79,9±9,8	71,3±7,1	52,7±8,2	67,95 BC
Porta	88,6±10,7	85,3±7,8	63,4±8,9	79,11 AB
Lateral direita	67,5±8,8	60,0±5,3	47,5±5,5	58,33 C
Parte oposta a porta	67,0±11,3	61,9±7,3	53,1±7,9	60,64 C
<b>Média</b>	74,35 a	69,39 a	55,59 b	

\*Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre Posição (linhas) e minúsculas entre temperaturas (colunas) não diferem entre si ao nível de 95 % de probabilidade pelo teste Tukey. Os Valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

Observa-se que a temperatura média na copa do secador foi de 81,09 °C, consideravelmente inferior àquela observada na entrada do secador, que foi de 156 °C, essa redução é explicada pela turbulência gerada nos gases dentro do secador pela ação dos ventiladores axiais, o que influencia na medição da temperatura pelos termopares.

As temperaturas observadas para a Classe 3 foram inferiores as demais, sendo este fato explicado basicamente por dois motivos: a temperatura ambiente nas secagens realizadas foi mínima de 6 °C durante a noite. Acredita-se que mesmo o secador sendo isolado termicamente, esse isolamento não o torna hermético, logo há troca de energia na forma de calor com o ambiente, fazendo com que parte da energia térmica dos gases no interior do secador seja perdida para o ambiente, reduzindo sua temperatura; outra possível explicação é devido à quantidade e tipo de água que foi eliminada da madeira.

O teor de umidade inicial da madeira utilizada nas secagens da Classe 3 foi de 39,99 %, valor muito inferior ao observado nas demais classes, logo, espera-se que, proporcionalmente, tenha sido retirada da madeira maior quantidade de água de adesão, a qual necessita maior quantidade de energia para ser removida em comparação a água livre. Esse fato pode ser comprovado pela umidade final observada, que foi de 22,96 %, umidade que se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras. Assim, para retirada da água da madeira da Classe 3, foi necessária maior quantidade de energia na forma de calor, que foi transferida do gás para a madeira, reduzindo sua temperatura, em maior proporção que a observada na demais classes.

Para as secagens realizadas com as madeiras pertencentes as Classes 1 e 2 de diâmetro, observa-se que não houve diferença significativa da temperatura média dentro do secador.

Comparando-se as temperaturas para uma mesma classe de diâmetro, verifica-se que as temperaturas da copa e próximas da porta do secador tiveram valores médios

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

próximos e maiores que as obtidas nas laterais do secador. A maior temperatura observada na copa se deve a menor densidade do gás quente, e ao fato de ele ter sido injetado na parte superior do secador, fazendo com que o mesmo permaneça nessa região e o gás frio desça, contribuindo para essa diferença de temperatura. Na região da porta, a maior temperatura, se deve a ação dos ventiladores axiais e pela ausência de barreira física ao fluxo de gás, assim a massa de gás quente deslocou-se para esta região com maior facilidade.

Verifica-se que a temperatura na lateral esquerda do secador foi maior que àquelas observadas na lateral direita, devido a proximidade com a tubulação de distribuição dos gases quentes para dentro do secador, que se divide em 4 aberturas, tendo a primeira próxima a lateral esquerda.

De modo geral observa-se que a temperatura dos gases na copa do secador foi de 81,09 °C em média, valor inferior à temperatura dos gases na entrada do secador (Tabela 1), que foi 156 °C em média. Essa diferença pode ser explicada pelo fluxo dos gases dentro do secador, que foi forçado pela ação dos exaustores e ventiladores axiais, o que não permite que os gases permaneçam por um tempo maior em contato com os termopares, não transferindo a quantidade de energia na forma de calor necessária para maior elevação da temperatura.

Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos de energia térmica intensiva, energia elétrica intensiva e eficiência térmica do secador.

Tabela 3. Eficiência térmica do secador em função das secagens das toras de diferentes classes de diâmetro.

Classe diâmetro	Energia Fornecida (J/s)	Energia Utilizada (J/s)	Energia Térmica Intensiva (J/s.Ton. madeira seca)	Energia Elétrica Intensiva (kW/Ton. madeira seca)	Eficiência Térmica
1	20305	12470	4707	49,3	0,61
2	20330	5388	4558	47,6	0,27
3	22480	7979	5440	51,4	0,36
Média	21038	8612	4902	49,4	0,41

Observa-se maior eficiência térmica para as secagens realizadas com as toras de menor diâmetro, ou seja, a energia na forma de calor fornecida para a secagem foi melhor aproveitada para esta classe. A menor eficiência foi obtida para a Classe 2, toras com diâmetros maiores, evidenciando maiores perdas térmicas neste processo, o que representa também a maior dificuldade de secagem dessas toras.

Os parâmetros obtidos de energia térmica intensiva e energia elétrica intensiva são importantes, pois servirão de suporte para dimensionamento de secadores industriais, pois com os valores obtidos e conhecendo-se a massa seca de madeira que será empilhada no secador, será possível estimar a quantidade de energia térmica necessária, e também estimar o consumo de energia elétrica do sistema, para se proceder a secagem.

## 4. CONCLUSÕES

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

As perdas térmicas ocorridas nas tubulações do transporte de gases não afetaram a temperatura de entrada dos gases no secador.

A maior eficiência térmica, sendo 0,61, foi obtida para as secagens da Classe 1.

O consumo de energia elétrica, por cada tonelada de madeira (massa seca), foi de 49,4 kW.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, à Secretaria de Estado, Ciência, Tecnologia e Ensino Superior – SECTES/MG, ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento – CNPq pelo apoio prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INCROPERA, FRANK P.; DEWITT, DAVID P.: **Fundamentos de transferência de calor e Massa**, 7ª Edição, p. 320-321, 2014, LTC Editora.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno – fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2012.

SKAAR, C. J. **Water in Wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218p.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO

